

基于相似模型试验的导管架平台有限元模型修正

林 红^{1,2}, 李 萍², 杨 蕾³, 齐 宝², 陈新雅², 陈国明¹

(1. 中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 3. 中国石油大学(华东)理学院, 山东青岛 266580)

摘要:根据设计尺寸建立的有限元模型与实际结构之间不可避免地存在一定偏差,须根据试验测量数据对有限元模型进行必要的修正。基于相似原理设计制作完整平台和损伤平台的缩尺模型,开展模态试验;根据模态置信准则(MAC)评价试验模态数据和有限元计算数据的相关性。应用灵敏度分析方法对结构设计变量进行分级,以有效识别出平台结构中的待修正参数。针对含有未知损伤的海洋平台,采用结构参数的优化方法,识别损伤位置并实现损伤平台有限元模型的更新。结果表明:对于完整平台,修正后前六阶固有频率的误差均值由修正前的 17.22% 降至 2.78%,修正后的有限元模型更接近试验结构;平台损伤后 MAC 显著降低,根据优化方法可准确定位出 2 个缺失构件的位置,且修正后固有频率的误差均值由 25.94% 降至 4.79%。通过修正可为在役海洋平台安全评估提供一个准确的有限元模型。

关键词:导管架海洋平台;相似模型;模态试验;灵敏度分析;有限元模型修正

中图分类号: TE 951 **文献标志码:** A

引用格式:林红,李萍,杨蕾,等. 基于相似模型试验的导管架平台有限元模型修正[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019,43(2):113-122.

LIN Hong, LI Ping, YANG Lei, et al. Finite element model updating of offshore jacket platforms based on similar model experiment [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019,43(2):113-122.

Finite element model updating of offshore jacket platforms based on similar model experiment

LIN Hong^{1,2}, LI Ping², YANG Lei³, QI Bao², CHEN Xinya², CHEN Guoming¹

(1. Center for Offshore Engineering and Safety Technology in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

3. College of Science in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Since differences between the prototype structure and the corresponding numerical model are inevitable, it is necessary to update the finite element model (FEM) according to the experimental data. Based on the similarity theory, scaled models of intact jacket platform and damaged jacket platform were designed and the modal experiments were carried out. According to the modal confidence assurance criterion (MAC), the correlation between the modal data obtained by the experimental and finite element analysis (FEA) was assessed. The sensitivity analysis was used to classify the structural design variables so as to effectively identify the key parameters to be modified. For the platform with unknown damages, the optimization method on structural parameters was adopted for damage location identification and the FEM updating. The objective function of this method is based on the measured and analytical modal data. The analysis results show that for the intact platform, after FEM updating the average error of the first six natural frequencies between experiments and FEA reduced from 17.22% to 2.78%, which shows that the updated FEM is much closer to the experimental model. For the damaged platform, the MAC decreases significantly; the two damaged members of the platform are accurately located according to the optimization method; and after upda-

ting the average error of the frequencies decreases from 25.94% to 4.79%. This project provides a more accurate FEM model for the safety assessment of in-service offshore platforms.

Keywords: offshore jacket platform; similar model; modal experiment; sensitivity analysis; finite element model updating

海洋平台长期服役在恶劣的海洋环境中,除受到风、浪、流等环境载荷,还可能遭受地震、火灾、船舶碰撞等突发载荷的作用^[1-2],因此为保证服役海洋平台结构的安全运行,定期对结构的安全性进行动态评价十分必要。其中一个能准确代表平台结构实际情况的有限元分析模型是结构安全评估的先决条件。然而,由于海洋平台结构的复杂性及在建立有限元模型过程中的各种不确定性、理想化假定及简化等因素,导致根据设计尺寸等建立的有限元模型与实际结构之间不可避免地存在一定偏差^[3-4]。同时服役多年的平台结构很易发生腐蚀、疲劳和局部屈曲、断裂等损伤,也会导致服役结构的物理参数存在着潜在的不稳定因素^[5]。为实现在役平台结构的服役状态和生存能力的精确评估,非常有必要根据监测、检测数据对结构的初始有限元模型进行必要的修正,以提高有限元分析结果的精度和可信度。近年来,有限元模型修正^[6-8]方法和技术已逐渐成为研究的热点问题,尤其在桥梁、飞机等工程结构的有限元模型修正方面^[9-11]取得较大的进展。在海洋工程领域,刘爱霞等^[12]将有限元模型修正思想引入简化的导管架平台结构,并重点修正了地基弹性支承的参数;李英超等^[13-14]引入交叉模型交叉模态(CM-CM)方法,并将其进行了发展。目前,虽然中国已有海洋平台安装了健康监测系统,但尚未有效利用采集到的海量数据为平台结构的状态评估和安全运行提供科学依据,对于复杂海洋平台结构的有限元模型修正方法和应用研究,仍存在较多困难。基于此,笔者针对完好平台及损伤平台两种结构,提出基于相似模型模态试验的有限元模型修正方法。根据相似原理设计制作缩尺试验模型,展开模态试验并根据模态测量值识别结构的模态特征。采用 ANSYS 进行平台有限元模型的模态计算,并根据模态置信准则(MAC)分析试验数据和有限元模拟模态数据的相关性。将优化方法引入含有未知损伤的海洋平台有限元模型修正问题,采用结构参数的优化方法识别损伤位置,并以含有构件缺失的试验模型为例对其有限元模型进行优化,从而实现损伤平台结构有限元模型的更新。

1 力锤激振下平台相似模型模态试验

1.1 平台相似模型的设计制作

所研究海洋平台为 4 桩腿 4 层导管架结构,每层均有横撑且最下面两层设置有 K 型斜撑,该平台

的实际设计高度为 29.5 m,质量为 270 t。导管架平台的试验模型须根据相似原理^[15]进行设计,严格根据几何相似、刚度相似和质量相似准则,设计并制作了 1 : 25 的缩尺试验模型,如图 1 所示,导管架主体采用不锈钢材料焊接而成。

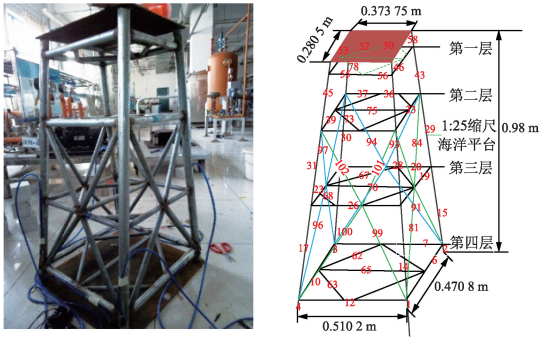


图 1 缩尺试验模型

Fig.1 Scaled experimental model description

首先,由几何相似条件确定缩尺模型的几何尺寸:

$$s_1 = 1 : 25. \tag{1}$$

其中, s_1 为几何比,表示缩尺模型与实际结构的几何尺寸之比。由此,计算出缩尺模型的高度为 0.99 m,其他尺寸如图 1 所示。

其次,由刚度相似条件确定缩尺模型中钢管的直径和壁厚。根据相似原理,有

$$S_E = 1, \text{ 则 } S_K = S_E s_1^2 = 1 : 625. \tag{2}$$

式中, S_E 和 S_K 分别为弹性模量比及刚度比,分别表示缩尺模型与实际结构的弹性模量之比和刚度之比。

由此,计算出缩尺模型中主要钢管的直径和壁厚,同时考虑市场上可供选择的钢管型号,确定缩尺模型中所用的主要钢管的尺寸如表 1 所示。

表 1 缩尺模型主要钢管的直径和壁厚

Table 1 Diameters and wall thicknesses of main pipes in scaled model mm

钢管位置	原型尺寸	缩尺尺寸
桩腿连接横撑处	1 378×38	32×3.00
桩腿其他部分	1 350×24	32×3.00
第三层横撑	900×26	20×2.50
第一、二、四层横撑	700×22	25×1.20
第二、三、四层斜撑	500×18	20×1.10
第一层斜撑	325×14	16×1.10

由质量相似比 s_n 确定试验模型的质量为

$$s_n = s_1^3 = 1 : 15\,625. \tag{3}$$

式中, s_n 为缩尺模型与原结构质量之比。

由此,计算出缩尺模型的理论质量为 17.28 kg,加工后试验模型称重为 17.3 kg。

1.2 模态试验装置及测点布置

试验模型不仅要满足与原型几何尺寸、质量及刚度等物理参数相似,更要保证其动力学特征相似。

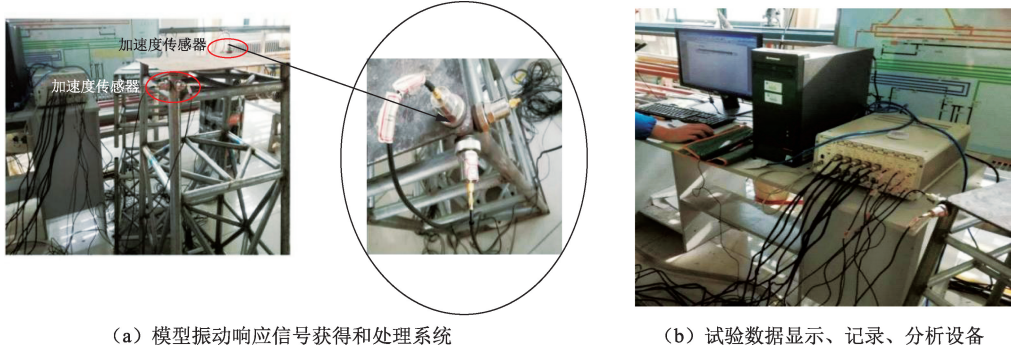


图 2 缩尺导管架模型的模态试验装置

Fig. 2 Modal experiment equipment for scaled jacket model

用钢帽力锤作为激振器^[16],锤击时,顶帽与试验结构发生冲击接触,对结构施加一个瞬态的冲击力。将加速度计固定在可能产生较大响应的测点处,即缩尺模型顶部的两个对角点;力锤敲击位置则选另一个角点,如图 2(a)所示。依次用大小近似相等的水平力分别在 X 方向和 Y 方向各敲击 10 次,通过单点输入多点输出的模态参数测试方法^[17],得出多组时域信号。每次用力锤敲击完成后等待数秒,待采集的信号变化曲线和数值稳定后,再进行数据的保存和记录,随后进行下一次敲击。

1.3 模态参数辨识

对于加速度传感器的采样数据首先进行降噪预处理,以减小噪声对试验结果的影响,常用的降噪方法有平滑处理和消除多项式趋势项处理^[18]两种方

为获取该缩尺模型的动态特征,进行了模态试验,提取其模态参数。试验装置见图 2,试验中用到的仪器设备包括:带力传感器的力锤 1 个、带磁座的加速度计 5 个、一台包含 2 通道电荷放大器和 16 通道 USB 接口信号采集的锤击测试仪。

法。其中平滑处理法(又称滑动平均法)主要为了消除噪声信号,而消除多项式趋势项方法主要消除外部环境对加速度信号采集仪器的干扰。由于本试验中噪声影响比外部温度等对信号采集仪器的干扰作用大得多,因此选择五点滑动平均法对采样数据进行降噪处理,图 3 为用滑动平均法处理前后的加速度信号。

对于通过预处理的加速度信号,通常可采用复指数法(Prony 法)或 ARMA 时间序列分析法进行模态参数识别^[18],其中复指数法是用一组指数项的线性组合来拟合等间距采样数据的方法,可从中得到结构的阻尼比、固有频率等信息;ARMA 法的原理是通过参数模型对试验数据进行处理来识别模态参数。将两种方法的结果绘制于图 4。

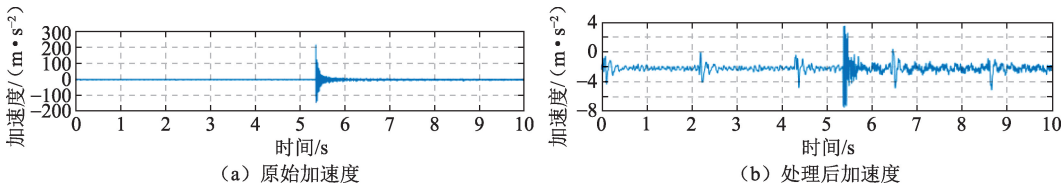


图 3 五点滑动平均法处理加速度信号

Fig. 3 Acceleration signal smoothing by five point moving average method

由图 4 看出,两种方法计算得出的拟合曲线与振动信号预处理曲线均能很好地拟合。选用复指数法计算前十阶模态频率,并通过阻尼比删除法和稳定图法^[19]对模态频率筛选,最终得出 X 向、 Y 向敲击的前六阶固有频率分别为:56.72、65.80、119.35、

240.27、268.06、282.38,及 58.85、66.59、121.23、239.27、262.06、276.38 Hz。理论上, X 向敲击、 Y 向敲击的试验数据应该一样,而试验中由于噪声及力锤敲击力等影响,会使两者产生一定误差,但该误差仍在允许范围内。

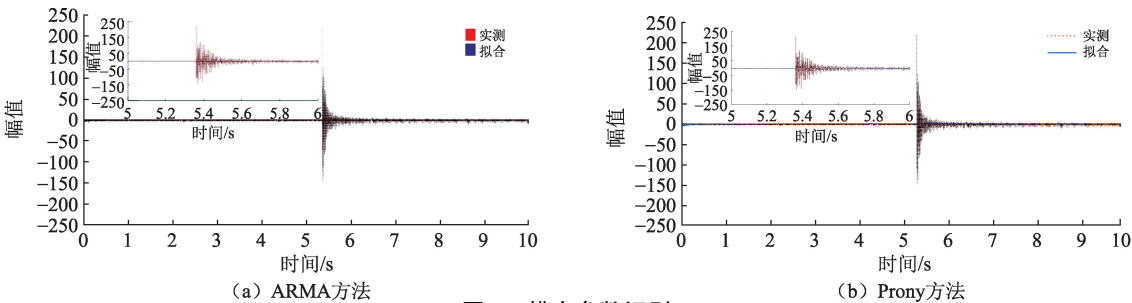


图 4 模态参数识别

Fig. 4 Modal parameter identification

2 缩尺平台有限元模型的模态计算及相关性分析

2.1 有限元模型的模态计算

基于有限元软件 ANSYS 建立缩尺导管架平台的有限元模型如图 5 所示。桩腿采用 pipe16 单元, 甲板用 shell63 单元, 桩腿和甲板连接处采用 beam4

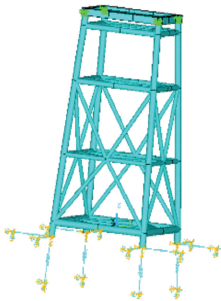


图 5 缩尺导管架有限元模型

Fig. 5 Finite element model of scaled jacket

单元,底部桩腿插入海底部分采用 combin14 弹簧单元并通过设置 3 个方向弹簧单元的刚度模拟平台底部的管-土相互作用。导管架结构选用 A3 不锈钢材料,弹性模量取为 200 GPa、密度为 7 800 kg/m³、泊松比为 0.3。采用 Block Lanczos 法对该导管架模型的动力特性进行分析,获得导管架模型的前六阶

模态固有频率分别为 66.69、74.58、107.56、301.98、320.50 和 326.76 Hz。

2.2 模态置信准则及相关性分析

由于结构的复杂性和不确定性,有限元模型无法真实、可靠地表示实际结构,有限元模型修正的目的即是根据试验模型的模态测试结果对初始有限元模型进行调整,使得有限元模型的模拟结果与试验结果相一致。在本文中仅选取了前 6 阶低频频率进行有限元模型的修正,为了研究试验数据和有限元计算得出的模态数据的相关性,采用模态置信准则 (MAC)^[20]进行评价,表示为

$$MAC_{ij} = \frac{[\Phi_i^T \Phi_j]^2}{\Phi_i^T \Phi_i \Phi_j^T \Phi_j} \quad (4)$$

式中,MAC_{ij}为第 i 阶试验振型与第 j 阶有限元振型之间的相关系数;Φ_i为第 i 阶试验振型;Φ_j为第 j 阶有限元振型。MAC 数值越大表明振型之间的相关性越大,若 MAC 数值接近于 1 则表明相关性非常好,反之若数值接近于 0 则表明相关性非常差。

表 2 列出了缩尺模型模态试验测量得到的前六阶固有频率及 ANSYS 有限元计算得到的前六阶固有频率。可见,有限元模型修正前最大误差为 26.21%;而 MAC 最大值为 0.94,MAC 最小值为 0.83,MAC 平均值为 0.90,这表明匹配情况较好。

表 2 前 6 阶频率的试验结果与有限元模拟结果及其相关性

Table 2 The first six natural frequencies of experimental and FEA and MAC

阶次	X 向敲击频率/ Hz	X 向 ANSYS 分析结果/Hz	误差/%	Y 向敲击 频率/Hz	Y 向 ANSYS 分析 结果/Hz	误差/%	MAC
1	56.72	66.69	17.58	58.85	66.69	13.32	0.83
2	65.80	74.58	13.30	66.59	74.58	12.00	0.90
3	119.35	107.56	9.88	121.23	107.56	11.28	0.93
4	240.27	301.98	25.68	239.27	301.98	26.21	0.91
5	268.06	320.50	19.56	262.06	320.5	22.30	0.94
6	282.38	326.76	15.72	276.38	326.76	18.23	0.89
平均	—	—	16.95	—	—	17.22	0.90

3 导管架有限元模型修正理论

3.1 有限元模型修正理论

有限元模型与试验模型不一致的原因主要由模型结构误差、阶次误差及参数误差引起。在有限元模型修正过程中,如何从众多参数中有效选择待修正的参数至关重要。通常认为,这 3 种误差中参数误差是有限元模型误差的主要原因,并假定参数误差可通过边界条件、材料参数、几何参数等来修正。修正参数选定后,有限元模型修正问题可转变成为对结构参数的优化问题,且往往为含有一定约束条件的约束优化问题^[21]。图 6 给出了有限元模型修正的一般流程。

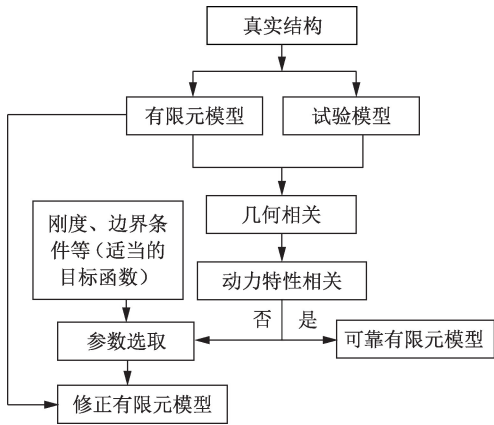


图 6 有限元模型修正流程

Fig. 6 Flow chart of finite element model updating

3.2 灵敏度分析

待修正参数的选择对提高修正模型与试验模型的相似度非常重要。一般情况下可考虑将边界条件、弹性模量、密度、板厚、壁厚、截面面积等设计变量作为待修正的参数。

目标函数 f 设置为(即考虑前六阶固有频率的相对误差平方和均值最小)

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^6 \left[\frac{(g_{e,i} - g_{s,i}(\mathbf{x}))}{g_{e,i}} \right]^2 / 6. \quad (5)$$

式中, $g_{e,i}$ 和 $g_{s,i}$ 分别为各阶固有频率的试验测量值和有限元模拟值, $i = 1, 2, \dots, 6$; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 n 个设计变量组成的向量。

选取结构的各阶固有频率的有限元模拟值 $g_{s,i}$ 作为修正模型的状态变量,则目标函数及状态变量对设计变量的灵敏度^[21]定义为

$$\nabla f(\mathbf{x}) = [\partial f / \partial x_1, \partial f / \partial x_2, \dots, \partial f / \partial x_n],$$
$$\nabla g_{s,i}(\mathbf{x}) = [\partial g_{s,i} / \partial x_1, \partial g_{s,i} / \partial x_2, \dots, \partial g_{s,i} / \partial x_n], \quad i = 1, 2, \dots, 6.$$

式中, x_j 为设计变量($j = 1, 2, \dots, n$); ∇ 为目标函数及状态变量对设计变量的梯度向量。

3.3 考虑参数约束的优化分析法

采用优化求解法对有限元模型进行修正,则在迭代过程中当目标函数最小时,有限元模型与实际结构的动力特性之间的差别也最小。

带有约束条件的优化问题的数学表述如下:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}), \mathbf{x} &= (x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \left\{ \begin{aligned} x_{j,l} &\leq x_j \leq x_{j,u}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ g_{i,l} &\leq g_{s,i}(\mathbf{x}) \leq g_{i,u}, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (6)$$

式中, f 为目标函数; x_j 为设计变量; n 为设计变量数目; $g_{s,i}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) 为状态变量,表示 1~6 阶频率的模拟值。

上述优化分析迭代收敛的条件设置为

$$f_{\min} = \sum_{i=1}^6 \left[\frac{(g_{e,i} - g_{s,i}(\mathbf{x}))}{g_{e,i}} \right]^2 / 6 \leq \varepsilon. \quad (7)$$

式中, ε 为给定精度,对于完整试验模型和损伤试验模型, ε 可分别取为 0.05² 和 0.1²。

4 导管架有限元模型修正结果及讨论

4.1 设计变量及灵敏度分析结果

修正导管架有限元模型所使用的初始设计变量见表 3,为使修正的变量在现实条件中适用,表中给出了其变化范围。

表 3 选择的初始设计变量

Table 3 Selected initial design variables

设计变量	变量描述	变量初值	变化范围/%
K_x	X 向支座刚度	30.0 MN/m	±30
K_y	Y 向支座刚度	33.0 MN/m	±30
K_z	Z 向支座刚度	28.0 MN/m	±15
E	弹性模量	200 GPa	±20
t_1	甲板厚度	0.005 m	±12
t_2	桩腿厚度	0.003 m	±25
t_3	横撑厚度	0.001 2 m	±20
t_4	斜撑厚度	0.001 m	±10
h	梁单元高度	0.03 m	±10
b	梁单元宽度	0.02 m	±10
A	梁单元截面积	0.000 6 m ²	±6
μ	泊松比	0.3	±8

由于不同阶次模态对同一参数的灵敏度一般不同,有些参数的灵敏度对低阶模态的影响很小,因此根据修正参数选取原则,需要根据有限元模型的前六阶模态分析各参数的灵敏度。对结构振动系统来讲,动力特性的灵敏度比率^[12]可表示为结构参数对其特征参数(特征值和特征向量)的敏感程度,因此通过灵敏度比率分析可选出对结构整体动力特性影响大的参数,从而使得模型修正更加有效。灵敏度

比率指各参数的灵敏度与其灵敏度区间的比值,由于灵敏度范围一定,因此各参数的灵敏度比率与灵敏度结果一致。

计算出弹簧刚度、弹性模量、密度、板厚、壁厚等修正参数前六阶模态灵敏度比率的平均值,绘制于图 7。由图 7 可见,弹簧刚度的修正对导管架有限元模型的修正结果至关重要,其次是弹性模量和壁厚,而密度及板厚对修正结果的影响比较小。根据各参数的灵敏度比率所在区间,将其划分为 I、II、III 级及大于 III 级,相应的各级灵敏度比率分别为 0.15、0.025、0.003、小于 0.003 (表 4),其中分级的数值是通过各修正参数对减少模型误差的贡献来确定。在此,选择前三级(I 级、II 级、III 级)作为修正变量,即包括 K_x 、 K_y 、 K_z 、 E 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 ρ 、 h 、 b 和 A 。而泊松比对频率修正影响比率小于 0.003,故剔除。

根据表 4,对前三位的修正参数即弹簧刚度、弹性模量和壁厚进行修正。进一步,分别研究其对前六阶各阶模态的灵敏度比率的影响,结果见图 8。由图 8 可知,弹簧刚度对第三阶模态的影响最小,而弹性模量和壁厚则对各阶模态的影响较均匀。

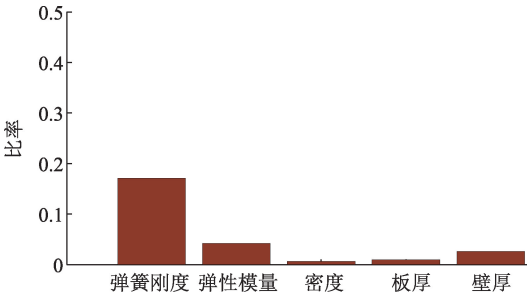


图 7 各修正参数灵敏度比率平均值

Fig. 7 Mean sensitivity indices for each correction parameter

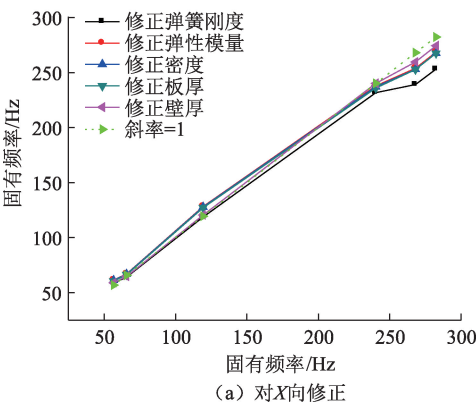


表 4 灵敏度等级			
Table 4 Sensitivity levels			
参数排序	修正参数	主要修正位置	灵敏度分级
1	弹簧刚度	边界条件	I 级
2	弹性模量	整体结构	II 级
3	壁厚	整体结构	II 级
4	板厚、密度	甲板	III 级
5	泊松比等	桩腿、横撑、斜撑	大于 III 级

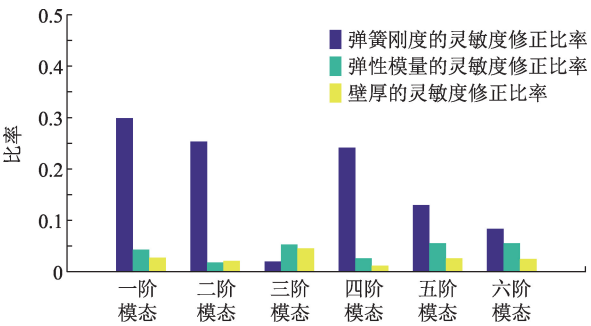


图 8 弹簧刚度、弹性模量、壁厚的灵敏度分析
Fig. 8 Sensitivity analysis of spring stiffness, elastic modulus and tube thickness

4.2 基于灵敏度分析的有限元模型修正结果

采用试算法^[22]对 I 级、II 级、III 级设计参数进行修正。试算法是一种简单易行的方法,其基本思路是:首先判断修正参数的变化是否使结构有限元模型的频率更接近试验测得频率,从而决定修正参数的变化趋势;然后,在两个非常接近的小区域采用二分法对参数进行修正,并最终确定修正参数的数值。图 9 给出了试算法的修正过程,依次按照修正弹簧刚度、弹性模量、密度、板厚和壁厚的顺序进行试算。由图 9(a)、(b)可见,当试算法进行到第 5 步后,有限元模型修正后计算的频率和试验结果非常接近,此时,点落在斜率为 1 的斜线上。

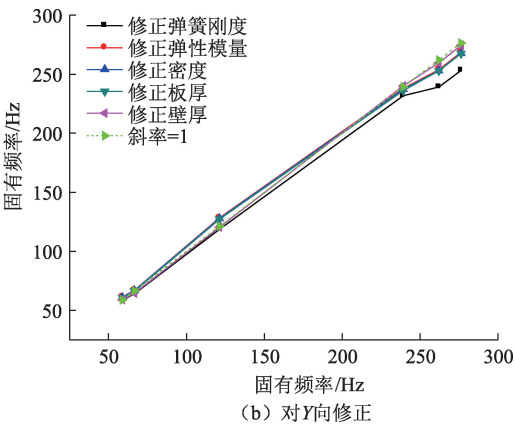


图 9 试算法修正过程

Fig. 9 FE updating progress of trial method

图 10 给出了试算法的修正结果。由图 10(a) 可见,模型修正后的前六阶频率与试验频率非常接近

近;图 10(b)进一步给出了各阶频率修正后的数值与试验数值之间的误差,可见,对于 X 向最大误差为 3.92%,平均误差为 2.11%;对于 Y 向最大误差为 2.99%,平均误差为 0.97%。由此可见, Y 向敲

击试验得到的频率与模型修正后的频率更接近。这些结果表明,有限元模型修正后,其固有频率与试验结果之间的最大误差为 3.92%,这一数值小于 5%,表明了试算法的有效性及可行性。

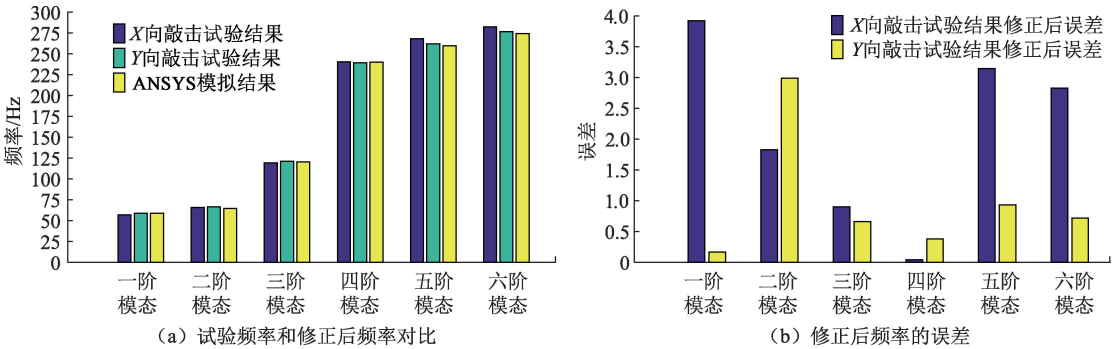


图 10 试算法修正结果

Fig. 10 FE updating results of the trial method

4.3 基于优化设计的有限元模型修正结果

对海洋平台的有限元模型进行修正,进行了 80 次迭代步计算。计算中发现,优化程序在第 4 步收敛结束,最佳设计序列是第 35 步,此时的设计变量、状态变量和目标函数如表 5 所示。其中小括号里的数值表示试验测量得到的固有频率,频率误差是指 ANSYS 优化后的数值与 Y 向敲击试验数值之差。由表 5 可见,该优化程序得到的前六阶频率误差的平均值为 2.78%,这表明优化分析法正确且可行。

表 5 设计变量、状态变量和目标函数

Table 5 Design variables, state variables and objective functions

名称	变量	初始值	修正后值	频率误差/%
设计变量	K_x	30.0 MN/m	38.0 MN/m	-26.7
	K_y	33.0 MN/m	40.0 MN/m	-21.2
	K_z	28.0 MN/m	30.5 MN/m	-8.93
	E	200 GPa	235 GPa	-17.5
	t_1	0.005 m	0.005 5 m	-10
	t_2	0.003 m	0.002 5 m	16.7
	t_3	0.001 2 m	0.001 m	16.7
	t_4	0.001 1 m	0.000 9 m	18.2
	ρ	7 800 kg/m ³	7 850 kg/m ³	-0.64
	h	0.03 m	0.029 m	3.33
	b	0.02 m	0.019 8 m	1
	A	0.000 6 m ²	0.000 57 m ²	4.3
	$g_{s,1}$	66.69 (58.85)	60.94	-3.55
	$g_{s,2}$	74.58 (66.59)	66.65	-0.09
状态变量	$g_{s,3}$	107.56 (121.23)	126.93	-4.70
	$g_{s,4}$	301.98 (239.27)	237.16	0.88
	$g_{s,5}$	320.50 (262.06)	251.84	3.90
	$g_{s,6}$	326.76 (276.38)	266.57	3.55
目标函数	$f_{\min}$	327.51×10 ⁻⁴	10.55×10 ⁻⁴	实现优化

4.4 损伤导管架模型模态试验及有限元模型修正结果

对于服役多年的海洋平台结构,在长期恶劣的环境载荷作用下,结构容易产生如腐蚀、疲劳、构件断裂等各种形式的损伤,从而导致结构的性能与初始状态发生变化。因此,对于服役中后期的海洋平台,结构的损伤定位是损伤结构有限元修正的前提。

采用图 11 所示的损伤导管架试验模型模拟构件断裂损伤,并设置了两处损伤位置。采用与前面

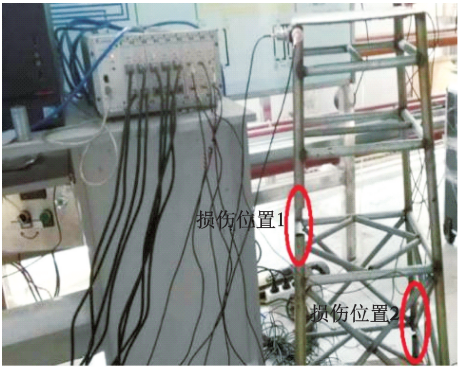


图 11 损伤导管架试验模型

Fig. 11 Damaged jacket test model

相同的方法对该损伤导管架结构进行了模态试验,并进行了模态参数识别。同时建立相应未损伤状态的有限元模型(图 12)用于模型的优化分析,图 12 中可见损伤单元的位置分别是 11 号和 15 号管单元。对该有限元模型进行模态计算,得到前六阶固有频率,并将试验结果及 ANSYS 计算结果列于表 6。由表 6 可见,结构发生损伤后,结构的固有频率明显下降。因此,在基于有限元分析进行损伤结构

的安全评估时,需要准确找出损伤部位,并据此对原始有限元模型进行修正。

从表 6 中可见,结构发生构件破坏后 *MAC* 值明显小于结构完好时的 *MAC* 值,尤其是第一阶振型的

MAC 值仅为 0.33。这表明结构损伤后试验振型和 ANSYS 模拟振型的相关性大大降低。即结构损伤后,其初始有限元模型已无法反应出结构的真实动力特性。

表 6 前 6 阶频率的试验结果与有限元模拟结果及其相关性

Table 6 The first six natural frequencies of experimental and FEA and MAC

阶次	X 向			Y 向			MAC
	敲击频率/Hz	ANSYS 分析结果/Hz	误差/%	敲击频率/Hz	ANSYS 分析结果/Hz	误差/%	
1	8.18	9.98	22.00	8.19	9.98	21.86	0.33
2	19.24	26.91	39.86	20.12	26.91	33.74	0.71
3	30.53	45.45	48.87	33.30	45.45	36.49	0.69
4	49.06	67.49	37.57	49.36	67.49	36.73	0.55
5	61.16	72.35	18.30	60.62	72.35	19.35	0.70
6	72.27	77.68	7.49	71.69	77.68	7.49	0.75
平均			29.02			25.94	0.62

表 7 设计变量、状态变量和目标函数

Table 7 Design variables, state variables and objective functions

名称	变量	初始值	修正后值	差值/%
设计变量	K_x	1.00 MN/m	1.28 MN/m	-28
	K_y	10.0 kN/m	11.5 kN/m	-15
	K_z	2.00 MN/m	2.24 MN/m	-12
	l_1	0.01 m	0.012 m	-20
	l_2	0.001 m	0.001 1 m	-10
	l_3	0.001 m	0.000 95 m	5
	l_4	0.001 m	0.000 9 m	10
	ρ	7 800 kg/m ³	7 850 kg/m ³	-0.641
	E_1 - E_{10}	200 GPa	235 GPa	-17.5
	E_{11}	200 GPa	1.00×10 ⁻⁷ Pa	100
	E_{12} - E_{14}	200 GPa	235 GPa	-17.5
	E_{15}	200 GPa	1×10 ⁻⁷ Pa	100
	E_{16} - E_{31}	200 GPa	235 GPa	-17.5
	h	0.03 m	0.028 m	6.67
	b	0.02 m	0.019 6 m	2
	A	0.000 6 m ²	0.000 57 m ²	5
状态变量	$g_{s,1}$	9.98 (8.18)	7.37	9.90
	$g_{s,2}$	26.91 (19.24)	17.36	9.77
	$g_{s,3}$	45.45 (30.53)	33.11	8.45
	$g_{s,4}$	67.49 (49.06)	46.72	4.76
	$g_{s,5}$	72.35 (61.16)	59.37	2.93
	$g_{s,6}$	77.68 (72.27)	68.47	5.26
目标函数	$f_{\min}$	1 043.93×10 ⁻⁴	53.96×10 ⁻⁴	实现优化

5 结 论

(1)利用模态置信准则 *MAC* 能够对缩尺模型模态试验数据和有限元模态计算数据的相关性进行有效评价。平台结构完整未损伤时,有限元模态计算值和试验测量值匹配良好;平台结构发生构件缺失的损伤时,试验振型与有限元模拟振型相关性比较差,*MAC* 值明显降低,第一阶 *MAC* 值仅为

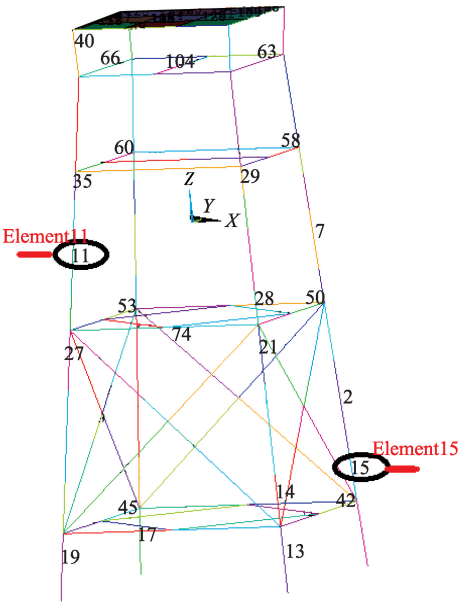


图 12 待修正模型

Fig. 12 Model to be updated

为定位出该损伤平台结构发生构件断裂的位置,并进行有限元模型的修正,采用前面的优化方法进行优化分析。优化程序共迭代 45 次,在第 4 步收敛结束,最佳设计序列为第 16 步,此时的设计变量、状态变量和目标函数见表 7。其中 E_1 到 E_{31} 分别表示导管架中各管单元的弹性模量,初始值均设置为 200 GPa,优化后 E_{11} 和 E_{15} 的数值几乎降为零,表明 11 号和 15 号管单元即为损伤单元,这与实际导管架的损伤位置完全一致,表明优化准确可行。优化结束后,得到前六阶频率误差的平均值为 4.79%,由此可以推断,损伤后导管架模型的频率误差稍微大于完整导管架模型的频率误差。

0.334 304。

(2)有限元模型修正之前,可通过灵敏度分析识别灵敏性较大的参数,不仅可减少计算量也使得收敛速度大大提高。边界条件和弹性模量的敏感度很高,成为关键的待修正参数;修正后有限元计算的前六阶固有频率与试验结果相比,其平均误差从17.22%下降至2.78%,修正后的有限元模型更接近试验结构。

(3)对于含有构件缺失的损伤平台有限元模型的修正问题,可采用考虑边界条件的优化设计方法,本算例中设计参数共有42个,前六阶频率为状态变量,设置前六阶固有频率误差平方和的平均值为优化目标函数。根据该优化方法可准确定位出两个构件的损伤位置;修正后有限元模型的前六阶频率误差平均值由修正前的25.94%大幅下降为4.79%,这表明该方法的修正效果较好。

参考文献:

- [1] 林红,陈国明,朱本瑞,等. 导管架海洋平台失效路径分析及连续倒塌机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):121-127.
LIN Hong, CHEN Guoming, ZHU Benrui, et al. Failure paths identification and progressive collapse mechanism analysis of offshore jacket platform[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(1):121-127.
- [2] 朱本瑞,陈国明,林红,等. 极端环境下导管架平台连续倒塌鲁棒性评估[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(6):138-144.
ZHU Benrui, CHEN Guoming, LIN Hong, et al. Robustness assessment of jacket platforms for progressive collapse under extreme environmental loading[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(6):138-144.
- [3] FRISWELL M I, MOTTERSHEAD J E. Finite element model updating in structural dynamics[M]. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [4] 张德文,魏阜旋. 模型修正与破损诊断[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [5] 林红,陈国明,朱本瑞,等. 海洋石油平台结构全寿命周期动态鲁棒性分析[J]. 石油学报,2015,36(2):246-252.
LIN Hong, CHEN Guoming, ZHU Benrui, et al. Dynamic robustness analysis of offshore platforms for the whole service life cycle[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015,36(2):246-252.
- [6] IMREGUN M, VISSER W J. A review of model updating techniques[J]. The Shock and Vibration Digest, 1991, 23(1):9-20.
- [7] MODAK S V, KUNDRA T K, NAKRA B C. Comparative study of model updating methods using simulated experimental data[J]. Computers & Structures, 2002,80:437-447.
- [8] MOTTERSHEAD J E, FRISWELL M I. Model updating in structural dynamics: a survey[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993,167(2):347-375.
- [9] 夏樟华. 基于静动力的桥梁结构有限元模型修正[D]. 福州:福州大学,2006.
XIA Zhanghua. Finite element model updating based on static and dynamic bridge structures [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [10] 孙正华,李兆霞,韩晓林. 大跨桥梁索塔有限元模型修正[J]. 工程抗震与加固改造,2006,28(1):50-54.
SUN Zhenghua, LI Zhaoxia, HAN Xiaolin. Finite element model updating for the tower of long-span bridges [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006,28(1):50-54.
- [11] YUEN K V. Updating large models for mechanical systems using incomplete modal measurement [J]. Mech Sys Signal Process,2012,28:297-308.
- [12] 刘爱霞,石湘,李华军. 导管架式海洋平台模型修正技术的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2006.
LIU Aixia, SHI Xiang, LI Huajun. The studies on model updating for offshore platforms [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [13] 李英超. 基于模态参数识别的海洋平台结构模型修正技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012.
LI Yingchao. Model updating of offshore platform structures based on model parameter identification [D]. Qingdao: Ocean University of china, 2012.
- [14] WANG S H, LI Y, LI H. Structural model updating of an offshore platform using the cross model cross mode method: an experimental study [J]. Ocean Engineering,2015(97):57-64.
- [15] 刘超. 导管架平台动力特性实验研究[D]. 天津:天津建筑大学,2014.
LI Chao. The dynamic characteristics of jacket platform experimental research [D]. Tianjin: Tianjin Architectural University, 2014.
- [16] GAO X, LING X Z, TANG L, et al. Soil-pile-bridge structure interaction in liquefying ground using shake table testing [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2011,31(7):1009-1017.
- [17] 王济,胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用

- [M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [18] 杨佑发,程亚鹏,李华新. 环境激励下基于经验模式分解的结构模态参数识别方法[J]. 土木工程学报, 2013,46(增2):73-78.
- YANG Youfa, CHENG Yapeng, LI Huaxin. Empirical mode decomposition based method of structural modal parameter identification under ambient excitation [J]. China Civil Engineering Journal, 2013,46(sup2):73-78.
- [19] 吕涛,徐长航,陈国明,等. 基于振动响应的导管架平台极限承载能力分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(3):155-162.
- LÜ Tao, XU Changhang, CHEN Guoming, et al. Ultimate bearing capacity analysis of jacket platforms based on vibration response[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(3):155-162.
- [20] ALLEMANG R J, PHILLIPS A W. Un-weighted and weighted versions of the modal assurance criterion (MAC) for evaluation of modal vector contamination [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2014.
- [21] 袁爱民,戴航,孙大松. 考虑边界条件约束和参数灵敏度的斜拉桥有限元模型修正[J]. 应用基础与工程科学学报,2010,18(6):900-909.
- YUAN Aimin, DAI Hang, SUN Dasong. Finite element model updating for a cable-stayed bridge considering the boundary condition constraint and parameter sensitivity [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(6):900-909.
- [22] LIU C S. Trial equation method based on symmetry and applications to nonlinear equations arising in mathematical physics [J]. Foundations of Physics, 2011,41(5):793-804.

(编辑 沈玉英)